



Hoja de Datos - Tecnología de Control de Contaminantes del Aire



1. *Nombre de la Tecnología:* Ciclones

Este tipo de tecnología es una parte del grupo de controles de la contaminación del aire, conocidos colectivamente como “pre-limpiadores,” debido a que a menudo se utilizan para reducir la carga de entrada de Materia Particulada (MP), a los dispositivos finales de captura, al remover las partículas abrasivas de mayor tamaño. Los ciclones también se les conoce como ciclones colectores, ciclones separadores, separadores centrífugos y separadores inerciales. En las aplicaciones donde operan muchos ciclones pequeños en paralelo, el sistema total se le conoce como ciclón de tubos múltiples, multi-ciclón o multiclón.

2. *Tipo de Tecnología:*

Remoción de MP por fuerzas centrífugas e inerciales, inducidas al forzar el cambio de dirección del gas cargado de partículas.

3. *Contaminantes Aplicables:*

Los ciclones se usan para controlar MP, principalmente MP de diámetro aerodinámico mayor de 10 micras (μm). Hay sin embargo, ciclones de alta eficiencia, diseñados para ser efectivos con MP de diámetro aerodinámico menor o igual a $10 \mu\text{m}$ y menor o igual a $2.5 \mu\text{m}$ (MP_{10} y $\text{MP}_{2.5}$). Aunque pueden usarse los ciclones para recolectar partículas mayores de $200 \mu\text{m}$, las cámaras de asentamiento por gravedad o los simples separadores por impulso (*momentum*), son normalmente satisfactorios y menos expuestos a la abrasión. (Wark, 1981; Perry, 1984).

4. *Límites de Emisión logrables/Reducciones:*

La eficiencia de colección de los ciclones varía en función del tamaño de la partícula y del diseño del ciclón. La eficiencia de ciclones generalmente, aumenta con (1) el tamaño de partícula y/o la densidad, (2) la velocidad en el conducto de entrada, (3) la longitud del cuerpo del ciclón, (4) el número de revoluciones del gas en el ciclón, (5) la proporción del diámetro del cuerpo del ciclón al diámetro del conducto de salida del gas, (6) la carga de polvo y, (7) el pulimento de la superficie de la pared interior del ciclón. La eficiencia del ciclón disminuirá con los aumentos en (1) la viscosidad del gas, (2) el diámetro del cuerpo, (3) el diámetro de la salida del gas, (4) el área del conducto de entrada del gas y, (5) la densidad del gas. Un factor común que contribuye a la disminución de eficiencias de control en los ciclones es el escape de aire en el conducto de salida del polvo (EPA, 1998).

Los márgenes de la eficiencia de control para los ciclones individuales, están con frecuencia

basados en tres clasificaciones de ciclones, es decir , convencional, alta eficiencia y alta capacidad.

El rango de eficiencia de control de los ciclones individuales convencionales se estima que es de 70 a 90 por ciento para MP; de 30 a 90 por ciento para MP₁₀ y de 0 a 40 por ciento para MP_{2.5}.

Los ciclones individuales de alta eficiencia están diseñados para alcanzar mayor control de las partículas pequeñas que los ciclones convencionales. De acuerdo con Cooper (1994), los ciclones individuales de alta eficiencia pueden remover partículas de 5 μm con eficiencias hasta del 90 por ciento, pudiendo alcanzar mayores eficiencias con partículas más grandes. Los rangos de eficiencia de control de los ciclones individuales de alta eficiencia son de 80 a 99 por ciento para MP; de 60 a 95 por ciento para MP₁₀ y de 20 a 70 por ciento para MP_{2.5}. Los ciclones de alta eficiencia tienen mayores caídas de presión, lo cual requiere de mayores costos de energía para mover el gas sucio a través del ciclón. Por lo general, el diseño del ciclón está determinado por una limitación especificada de caída de presión, en lugar de cumplir con alguna eficiencia de control especificada (Andriola, 1999; Perry, 1994).

De acuerdo con Vataavuk (1990), los ciclones de alta capacidad están garantizados solamente para remover partículas mayores de 20 μm , aunque en cierto grado ocurra la colección de partículas más pequeñas. Los rangos de eficiencia de control de los ciclones de alta capacidad son de 80 a 99 por ciento para MP; de 10 a 40 por ciento para MP₁₀ y de 0 a 10 por ciento para MP_{2.5}. Se ha reportado que los multi-ciclones han alcanzado eficiencias de recolección de 80 a 95 por ciento para partículas de 5 μm (EPA, 1998).

5. Tipo de Fuente Aplicable: Punto (Puntual en México)

6. Aplicaciones Industriales Típicas:

Los ciclones son diseñados para muchas aplicaciones. Generalmente, los ciclones por si solos no son adecuados para cumplir con las reglamentaciones más estrictas en materia de contaminación del aire, pero tienen un propósito importante como pre-limpiadores antes del equipo de control final más caro, tal como los precipitadores electrostáticos (PEs) o los filtros de tela. Además del uso en tareas de control de la contaminación, los ciclones se utilizan en muchas aplicaciones de proceso, como por ejemplo, para la recuperación y reciclado de productos alimenticios y materiales de proceso tales como los catalizadores. (Cooper, 1994).

Los ciclones se utilizan ampliamente después de operaciones de secado por aspersión en las industrias química y de alimentos y después de las operaciones de trituración, molienda y calcinación en las industrias química y de minerales para recolectar material útil o vendible. En la industria de metales ferrosos y no ferrosos, los ciclones se utilizan con frecuencia como primera etapa en el control de las emisiones de MP en plantas; *sinter* (plantas que crean una masa coherente por calentamiento sin fundición), *roasters* (un tipo horno para calentar material inorgánico con acceso al aire y efectuar un cambio sin fundir), *kilns* (tipo de hornos de calcinación, cuba o cochura). La MP proveniente de procesos de desintegración fluida, es removida por ciclones para facilitar el reciclado de los catalizadores. Las unidades industriales y comerciales de combustión que utilizan madera y/o combustibles fósiles, usan comúnmente

ciclones múltiples (generalmente después de torres húmedas de absorción, PEs o filtros de tela), los cuales recolectan MP fina ($< 2.5 \mu\text{m}$), con mayor eficiencia que un solo ciclón. En algunos casos, las cenizas recolectadas son inyectadas de nuevo en la unidad de combustión para mejorar la eficiencia de control de MP (AWMA, 1992; Avallone, 1996; STAPPA/ALAPCO, 1996; EPA, 1998).

7. *Características de la Corriente de Emisión:*

- a. **Flujo de aire:** Las velocidades típicas del flujo de gas para unidades de un solo ciclón son de 0.5 a 12 metros cúbicos por segundo a condiciones estándares (m^3/seg) (1,060 a 25,400 pies cúbicos por minuto a condiciones estándares (*standard cubic foot per minute (scfm)*). Los flujos en la parte alta de este rango y mayores (hasta aproximadamente $50 \text{ m}^3/\text{seg}$ o $106,000 \text{ scfm}$), utilizan ciclones múltiples en paralelo. (Cooper, 1994). Hay unidades de un solo ciclón que se emplean en aplicaciones especializadas, las cuales tienen flujos desde $0.0005 \text{ m}^3/\text{seg}$ (1.1 scfm) hasta $30 \text{ m}^3/\text{seg}$ ($63,500 \text{ scfm}$) aproximadamente (Wark, 1981; Andriola, 1999).
- b. **Temperatura:** Las temperaturas del gas de entrada, están limitadas únicamente por los materiales de construcción de los ciclones y han sido operados a temperaturas tan altas como 540°C ($1,000^\circ\text{F}$) (Wark, 1981; Perry, 1994).
- c. **Carga de Contaminantes:** Las cargas típicas de contaminantes en el gas van de 2.3 a 230 gramos por metro cúbico a condiciones estándares (g/m^3), (1.0 a 100 granos por pie cúbico a condiciones estándares (*gr/scf*)) (Wark, 1981). En aplicaciones especializadas, estas cargas pueden ser tan altas como $16,000 \text{ g}/\text{m}^3$ ($7,000 \text{ gr}/\text{scf}$) y tan bajas como $1 \text{ g}/\text{m}^3$ ($0.44 \text{ gr}/\text{scf}$) (Avallone, 1996; Andriola, 1999).
- d. **Otras Consideraciones:** Los ciclones trabajan más eficientemente con cargas de contaminantes más altas, siempre y cuando no se obstruyan. Generalmente, las cargas más altas de contaminantes se asocian a diseños para flujos más altos. (Andriola, 1999).

8. *Requisitos para el Pre-tratamiento de las Emisiones:*

Ningún pre-tratamiento es necesario para los ciclones.

9. *Información de Costos* (en U.S. dolares):

Los siguientes son rangos de costos (expresados en dólares del tercer trimestre de 1995), para un solo ciclón convencional a condiciones típicas de operación, determinados utilizando una hoja de cálculo de la EPA para la estimación de costos (EPA, 1996), en base a la velocidad de flujo volumétrico de la corriente contaminada a tratar. Con el fin de calcular la eficiencia de costos, en el ejemplo los flujos se suponen que están entre 0.5 y $12 \text{ m}^3/\text{seg}$ ($1,060$ y $25,400 \text{ scfm}$),

la carga de MP a la entrada se supone que es aproximadamente entre 2.3 y 230 g/m³ (1.0 y 100 gr/scf), y la eficiencia de control se supone que es del 90 por ciento. Los costos no incluyen los costos de transporte y disposición del material reunido. Los costos de capital pueden ser mayores que los de los rangos mostrados, para aplicaciones en las que se requieren materiales caros. Como regla, las unidades más pequeñas para el control de corrientes contaminadas con bajas concentraciones de MP, resultarán más caras (por unidad de velocidad de flujo volumétrico y por cantidad de contaminante controlada), que una unidad grande que controla corrientes contaminadas con concentraciones altas de MP.

- a. **Costo de Capital:** \$4,200 a \$5,100 por m³/seg (\$2.00 a \$2.40 por scfm).
- b. **Costo de Operación y Mantenimiento:** \$2,400 a \$27,800 por m³/seg (\$1.10 a \$13.10 por scfm), anualmente.
- c. **Costo Anualizado:** \$2,800 a \$28,300 por m³/seg (\$1.30 a \$13.40 por scfm), anualmente.
- d. **Eficiencia de Costo:** \$0.45 a \$460 por tonelada métrica (\$0.41 a \$420 por tonelada corta), costo anualizado por tonelada de contaminante controlado por año.

Para flujos mayores a 10 m³/seg (21,200 scfm), aproximadamente y hasta 50 m³/seg (106,000 scfm), usualmente se utilizan ciclones múltiples operando en paralelo. Suponiendo un mismo rango de carga de contaminantes y una eficiencia de 90 por ciento, los siguientes rangos de costo (expresados en dólares al tercer trimestre de 1995), fueron determinados para ciclones múltiples, utilizando una hoja de cálculo de la EPA para estimación de costos (EPA, 1996), en base a la proporción del flujo volumétrico a la corriente contaminada tratada.

- a. **Costo de Capital:** \$4,100 a \$5,000 por m³/seg (\$2.00 a \$2.40 por scfm).
- b. **Costo de Operación y Mantenimiento:** \$1,600 a \$2,600 por m³/seg (\$0.75 a \$1.20 por scfm), anualmente.
- c. **Costo Anualizado:** \$2,000 a \$3,100 por m³/seg (\$0.90 a \$1.50 por scfm), anualmente.
- d. **Eficiencia de Costo:** \$0.32 a \$50 por ton. métrica (\$0.29 a \$46 por ton. corta), costo anualizado por ton. de contaminante controlado por año.

10. Teoría de la Operación:

Los ciclones utilizan la inercia para remover las partículas de la corriente del gas. Los ciclones imparten una fuerza centrífuga a la corriente de gas, normalmente en una cámara de forma cónica. Los ciclones operan creando un vórtice doble dentro del cuerpo del mismo. El gas que entra es forzado a bajar por el cuerpo del ciclón con movimiento circular cerca de la superficie del tubo del ciclón. En el fondo del ciclón, la dirección del gas se invierte

y sube en espirales por el centro del tubo y sale por la tapa del ciclón. (AWMA, 1992).

Las partículas en la corriente del gas son forzadas hacia la pared del ciclón por la fuerza centrífuga del gas en rotación, pero se les opone la fuerza de arrastre del gas que pasa por el ciclón hacia la salida. Con las partículas más grandes, la inercia vence a la fuerza de arrastre, haciendo que las partículas alcancen la pared del ciclón y sean colectadas. Con las partículas más pequeñas, la fuerza de arrastre es mayor que la inercia, ocasionando que las partículas salgan del ciclón junto con el gas. La gravedad también hace que las partículas más grandes que llegan a la pared del ciclón bajen hacia la tolva. Aunque utilizan el mismo mecanismo de separación que los separadores por impulso, los ciclones son más efectivos porque tienen un patrón de flujo de gas más complejo (AWMA, 1992).

Los ciclones se clasifican generalmente en cuatro tipos, dependiendo de como se introduzca la corriente de gas al equipo y de como se descargue el polvo colectado. Los cuatro tipos incluyen entrada tangencial, descarga axial; entrada axial, descarga axial; entrada tangencial, descarga periférica; y entrada axial, descarga periférica. Los primeros dos tipos son los más comunes (AWMA, 1992).

La caída de presión es un parámetro importante, ya que tiene relación con los costos de operación y la eficiencia de control. Para un ciclón determinado, se pueden obtener mayores eficiencias de control con velocidades de entrada más altas, pero esto también incrementa la caída de presión. En general, 18.3 metros por segundo (60 pies por segundo), es considerada la mejor velocidad de operación. Los rangos comunes de caídas de presión para los ciclones son de 0.5 a 1 kilo-pascales (kPa) (2 a 4 pulgadas (*inches*) de H₂O), para unidades de baja eficiencia (alta capacidad); de 1 a 1.5 kPa (4 a 6 *inches* H₂O), para unidades de mediana eficiencia (convencionales); y de 2 a 2.5 kPa (8 a 10 *inches* H₂O), para unidades de alta eficiencia (AWMA, 1992).

Cuando se desean alta eficiencia (lo que requiere diámetros pequeños del ciclón) y alta capacidad al mismo tiempo, se pueden operar varios ciclones en paralelo. En un ciclón de tubos múltiples, la coraza contiene un gran número de tubos con entrada y salida comunes de gas en la cámara. El gas entra a los tubos a través de aspas axiales que le imparten un movimiento circular (AWMA, 1992). Otra unidad de alta eficiencia, el separador ciclónico húmedo, utiliza una combinación de fuerza centrífuga y aspersion de agua para mejorar la eficiencia de control.

11. Ventajas/Pros:

Las ventajas de los ciclones incluyen las siguientes (AWMA, 1992; Cooper, 1994; y EPA, 1998):

1. Bajos costos de capital;
2. Falta de partes móviles, por lo tanto, pocos requerimientos de mantenimiento y bajos costos de operación.
3. Caída de presión relativamente baja (2 a 6 pulgadas de columna de agua), comparada con la cantidad de MP removida;

4. Las limitaciones de temperatura y presión dependen únicamente de los materiales de construcción;
5. Colección y disposición en seco; y
6. Requisitos espaciales relativamente pequeños.

12. Desventajas/Contras:

Las desventajas de los ciclones incluyen las siguientes (AWMA, 1992; Cooper, 1994; y EPA, 1998):

1. Eficiencias de colección de MP relativamente bajas, particularmente para MP de tamaño menor a $10 \mu\text{m}$
2. No pueden manejar materiales pegajosos o aglomerantes; y
3. Las unidades de alta eficiencia pueden tener altas caídas de presión.

13. Otras Consideraciones:

Utilizando ciclones múltiples, ya sea en serie o en paralelo, para tratar un gran volumen de gas, resulta en eficiencias más altas pero a costa de una mayor caída de presión. Mayores caídas de presión significan mayores consumos de energía y mayores costos de operación. Deben de analizarse varios diseños para alcanzar la combinación óptima de eficiencia colección y caída de presión (Cooper, 1994).

14. Referencias:

Andriola, 1999. T. Andriola, Fisher-Klosterman, Inc., (502) 572-4000, personal communication with Eric Albright, October 14, 1999.

Avallone, 1996. "Marks' Standard Handbook for Mechanical Engineers," edited by Eugene Avallone and Theodore Baumeister, McGraw-Hill, New York, NY, 1996.

AWMA, 1992. Air & Waste Management Association, Air Pollution Engineering Manual, Van Nostrand Reinhold, New York, NY, 1992.

Cooper, 1994. David Cooper and F. Alley, Air Pollution Control: A Design Approach, 2nd Edition, Waveland Press, Prospect Heights, IL, 1994.

EPA, 1996. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, "OAQPS Control Cost Manual," Fifth Edition, EPA 453/B-96-001, Research Triangle Park, NC February, 1996.

EPA, 1998. U.S. EPA, Office of Air Quality Planning and Standards, "Stationary Source Control Techniques Document for Fine Particulate Matter," EPA-452/R-97-001, Research Triangle Park, NC, October, 1998.

Perry, 1984. "Perry's Chemical Engineers' Handbook," edited by Robert Perry and Don Green, 6th Edition, McGraw-Hill, New York, NY, 1984.

STAPPA/ALAPCO, 1996. State and Territorial Air Pollution Program Administrators and the Association of Local Air Pollution Control Officials (STAPPA/ALAPCO), "Controlling Particulate Matter Under the Clean Air Act: A Menu of Options," STAPPA/ALAPCO, Washington, DC, July, 1996.

Vatavuk, 1990. W.M. Vatavuk, "Estimating Costs of Air Pollution Control," Lewis Publishers, Chelsea, MI, 1990.

Wark, 1981. Kenneth Wark and Cecil Warner, "Air Pollution: Its Origin and Control," Harper Collins, New York, NY, 1981.